

통합 하이브리드시스템의 압력강하 거동 및 바이오필터 담체의 미생물 population 분포

이은주****.† · 임광희****.†

*대구대학교 화학공학과
38453 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15
**산업 및 환경폐가스연구소
38453 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15
***에코밸리글로벌
38911 경상북도 영천시 금호읍 대구대길 333

(2021년 11월 17일 접수, 2021년 11월 22일 수정본 접수, 2021년 12월 14일 채택)

Pressure Drop of Integrated Hybrid System and Microbe-population Distribution of Biofilter-media

Eun Ju Lee****.† and Kwang-Hee Lim****.†

*Department of Chemical Engineering, Daegu University, 15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Kyongsan-si, Kyungbuk, 38453, Korea

**Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment, 15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Kyongsan-si, Kyungbuk, 38453, Korea

***Eco Valley Global, 333 Daegudae-gil, Gemho-eup, Youngchon-si, Kyungbuk, 38911, Korea

(Received 17 November 2021; Received in revised from 22 November 2021; Accepted 14 December 2021)

요 약

교대로 운전되는 광촉매반응기 공정, 및 바이오필터 공정(전통적 바이오필터(L 반응기)와 두 개의 유닛(unit)을 가지는 개선된 바이오필터시스템(R 반응기))로 구성된 통합처리시스템에서, 에탄올과 황화수소를 동시 함유한 폐가스 처리를 수행하는데 발생하는 공정 당 압력강하(Δp)와 바이오필터 공정의 미생물 population 분포를 관찰하였다. 교대로 운전되는 광촉매 반응기의 Δp 는, 바이오필터의 Δp 와 비교할 때에 무시할 정도로 작게 관찰되었다. L 반응기의 Δp 는, 통합처리시스템의 운전 중에 계속 증가하여 4.0~5.0 mmH₂O (i.e., 5.0~6.25 mmH₂O/m)로 증가하였다. 한편 R 반응기의 경우에는 L 반응기의 Δp 의 약 16~20% 이하인 작은 Δp 를 나타내었다. 본 연구에서 적용한 공극율이 큰 페타이어 담체 등의 바이오필터 담체 및 R 반응기 설계의 적용이, 목재 칩(wood chip)과 목재 바크(wood bark)의 50 대 50 인 혼합물을 바이오필터 담체로 사용한 전통적 바이오필터의 보고된 압력강하 값의 각각 37~50%와 40~53% 만큼 압력강하 저감에 공헌하였다고 분석되었다. 또한 본 연구의 R 반응기 운전에서 압력강하 값이, 공극율이 큰 화산석(scoria)과 compost를 75 대 25로 혼합한 복합 담체를 충전한 전통적 바이오필터의 보고된 압력강하 값보다 약 80%만큼 저감된 결과는 주로 R 반응기 설계의 적용에 기인하였다고 해석되었다. 한편, 통합처리시스템에서 바이오필터 담체의 microbial population 분포로서 L 반응기 및 R 반응기의 담체 내 미생물 콜로니 수 비교에서는 L 반응기가 제일 밑단에서 다른 윗 단의 콜로니 수보다 거의 두 배로 증가하였으나; R 반응기의 경우는 R_{dn} 반응기와 R_{up} 반응기 각각의 상단과 하단에서 고르게 분포하였고 L 반응기보다 콜로니 수가 평균적으로 약 50% 정도 더 컸다. 이러한 현상은 R 반응기의 상단과 하단의 함수율이 50-55%의 고른 분포를 보인 것에 기인하였다. 따라서 개선된 바이오필터시스템이 전통적 바이오필터보다 Δp 와 미생물 population 분포에서 더욱 우수한 특성을 보였다.

Abstract – In this study, waste air containing ethanol and hydrogen sulfide, was treated by an integrated hybrid system composed of two alternatively-operating UV/photocatalytic reactor-process and biofilter processes of a biofilter system having two units with an improved design (R reactor) and a conventional biofilter (L reactor). Both a pressure drop (Δp) per unit process of the integrated hybrid system and a microbe-population-distribution of each biofilter process were observed.

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: khlim@daegu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The Δp of the UV/photocatalytic reactor process turned out very negligible. The Δp of the L reactor was observed to increase continuously to 4.0~5.0 mmH₂O (i.e., 5.0~6.25 mmH₂O/m). In case of R reactor, its Δp showed the one below ca. 16~20% of the Δp of the L reactor. Adopting such microbes-carrying biofilter media with high porosity as waste-tire crumb media, and the improved biofilter design, contributed to Δp of this study, reduced by ca. 37~50% and 40~53%, respectively, from the reported Δp of conventional biofilter packed with biofilter media of the mixture (50:50) of wood chip and wood bark. In addition, the Δp of R reactor in this study, reduced by ca. 80% from the reported Δp of conventional biofilter packed with biofilter media of the mixture (75:25) of scoria with high porosity and compost, was mainly attributed to adopting the improved biofilter design. On the other hand, in case of L reactor, the CFU counts in its lowest column was analyzed double as much as those in any other columns. However, in case of R reactor, its CFU counts were bigger by 50% than the one of L reactor and its microbes were evenly distributed at its higher and lower columns of R_{dn} reactor and R_{up} reactor. This phenomena was attributed to an even moisture distribution of 50~55% of R reactor at its higher and lower columns. Therefore, R reactor showed superb characteristics in terms of both Δp and microbe-population-distribution, compared to L reactor.

Key words: Waste-air, Integrated hybrid system, Alternately-operating UV/photocatalytic reactor, Biofilter system with an improved design, Conventional biofilter, Pressure drop, Moisture distribution, Microbe population distribution

1. 서 론

바이오필터는 가스상의 오염원 제거를 위한 다른 오염원 제거법과 비교하였을 때에 비교적 낮은 비용, 간단한 공정관리, 적게 요구되는 에너지 및 오염원의 완전분해 등의 장점 때문에 널리 활용되고 있다[1,2]. 이러한 바이오필터 공정의 압력강하를 감소시키는 것은 바이오필터 운전에서 에너지 소비의 절감을 위하여 매우 중요하다고 알려져 있다[3]. 따라서 바이오필터에서 바이오매스의 더 고른 분산과 더 낮은 축적률을 통하여, 적은 압력강하로 편류의 발생 없이 안정적인 바이오필터의 운전을 지속하기 위한 많은 연구가 수행되어왔다[4-6]. 그뿐만 아니라 바이오필터에서 과도한 바이오매스의 물리적, 화학적 및 생물학적 수단에 의한 제어도 지속적인 연구가 되어왔다[7-13]. 안정적인 바이오필터의 지속적 운전을 위한, 바이오필터에 적합한 미생물 담체의 선정은 바이오필터의 높은 오염원 제거효율을 위하여 중요하다[14-17]. 이상적인 바이오필터 담체의 요건으로서, 미생물 성장을 위한 영양소, 수분 및 탄소공급 등의 적당한 환경, 미생물의 담지를 위한 큰 비표면적, 담체 수축과 편류(channeling)에 대한 안정성, 높은 수분 함유성, 높은 공극율 등이 고려되었다[18,19].

바이오필터 담체의 수분 함유량은 미생물 활성을 위하여 필요하나, 너무 큰 수분함유율은 담체의 공극을 폐쇄하기 때문에 편류를 발생시켜서 담체를 통한 폐가스 처리를 제한하고 바이오 필름(biofilm)에서 혐기상(anaerobic zone)을 생성시키기 때문에 바이오필터의 오염원 제거효율을 결정하는 가장 중요한 인자이다[20,21]. 그럼에도 불구하고, 수분은 담체 사이로 배출되거나 바이오필터 내의 기류(air flow)에 의하여 증발되기 때문에 과도한 수분량은 일반적으로 문제를 발생시키지 않으며, 수분함유율의 최적 범위는 바이오필터 담체의 특성에 달려있다고 보고되고 있다[2,22]. Grubecki[23]는 8.1~64.5%의 수분함유율의 범위 내에서 총 공극율이 최대 0.63인 목재 칩(wood chip)과 목재 바크(wood bark)의 50 대 50인 혼합물을 바이오필터 담체로 사용하여 악취와 기타 가스상의 오염원 배출을 저감하는 폐가스 처리를 수행하면서 여러 가지의 공탐 속도(superficial velocity)의 조건에서 압력강하를 관찰하였는데, 바이오필터 담체의 수분함량 조절이 효율적인 폐가스 처리를 위한 압력강하를 위하여 매우 중요하다고 보고하였다. Amin 등[24]은 바이오필터 담체로서 공극율이 각각 0.7 및 0.58인 화산석(scoria)과 compost를 75 대 25로 혼합한 복합 담체를 충전한 바이오필터를

사용하여 자일렌(xylene) 증기(vapor)를 처리하였다. 바이오필터의 유효높이는 80 cm이었고 최대 공탐속도가 0.88 cm/s의 조건에서 바이오필터를 운전하여 4 mmH₂O 이하의 압력강하를 관찰하였고 보고하였다. Lee와 Lim[25]은 두 개로 나누어지는 개선된 바이오필터 설계[26]를 적용하고, 총 공극율과 외부 및 내부 공극율이 각각 0.74, 0.6 및 0.14를 가지는 페타이어 담체, 총 공극율이 각각 0.55 및 0.7인 입상 활성탄 및 compost를 동량씩 충전한 개선된 바이오필터의 압력강하 및 미생물 population 분포 등을, 폐가스 유량을 0.5 L/min (stage 1)부터 2 L/min (stage 8)으로 총 8단계(100일) 동안 에탄올 및 황화수소의 농도를 증가시키면서 관찰하였다. 또한, 같은 유효 부피를 갖고 unidirectional flow (UF)를 갖는 전통적 바이오필터의 경우와 비교하였다. 전통적 바이오필터의 경우에는 폐가스 유량이 2 L/min으로 커진 stage 4에서 압력강하가 약 13 mmH₂O 까지 증가하였으나, 개선된 바이오필터의 경우에는 총 8단계(100일) 동안 지속적으로 약 1 mmH₂O 이하의 압력강하를 보였다. 이와 같이 개선된 바이오필터는 전통적 바이오필터 압력강하의 약 40~80% 이상을 감소시켰다고 보고되었다. Lee와 Lim[27]은 본 연구의 전반부(part 1)로서 Lee와 Lim[28] 및 Lee 등[29]이 보고한 교대로 운전되는 두 개의 UV/광촉매 반응기로 구성된 폐가스 처리시스템과, Lee와 Lim[25]이 보고한 개선된 바이오필터의 설계[26]를 가지는 두 개로 나누어지는 개선된 바이오필터 시스템 또는 전통적 바이오필터로 구성된 통합된 하이브리드 폐가스 처리시스템(통합 처리시스템)을 구축하고, 구축된 통합처리시스템을 운전하여 에탄올과 황화수소를 함유한 폐가스 처리 거동을 관찰하고, 관련된 공정의 처리 특성을 분석하였다.

본 연구(part 2)에서는 에탄올과 황화수소를 함유한 폐가스 처리를 위한, 교대로 운전되는 두 개의 UV/광촉매 반응기와 개선된 바이오필터 시스템 또는 전통적 바이오필터로 구성된 통합처리시스템의 운전에서 관찰된 각 단위공정의 압력강하 특성과 적용된 바이오필터의 미생물 분포를 중심으로 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 통합처리시스템의 개요

본 연구에서의 교대로 운전되는 두 개의 UV/광촉매반응기와 개선된 바이오필터로 구성된 통합처리시스템의 구성 및 개요는 Fig. 1과 같다.

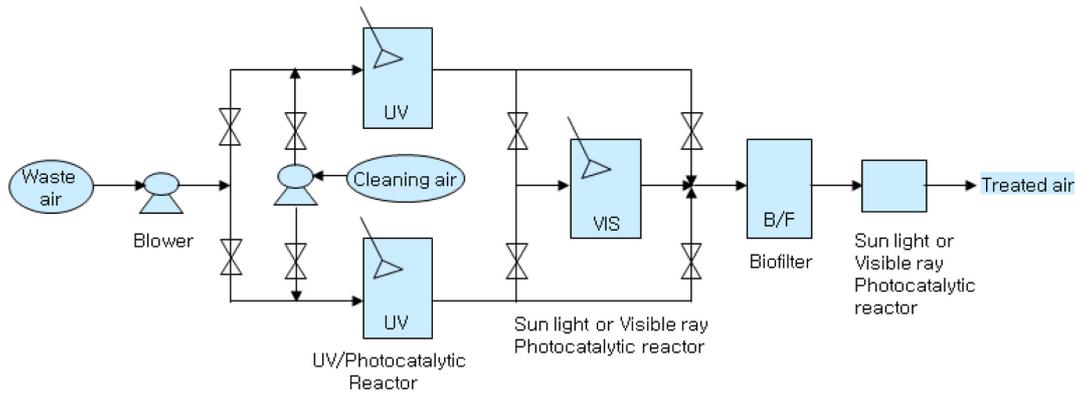


Fig. 1. Schematic diagram of integrated hybrid waste-air treatment system.

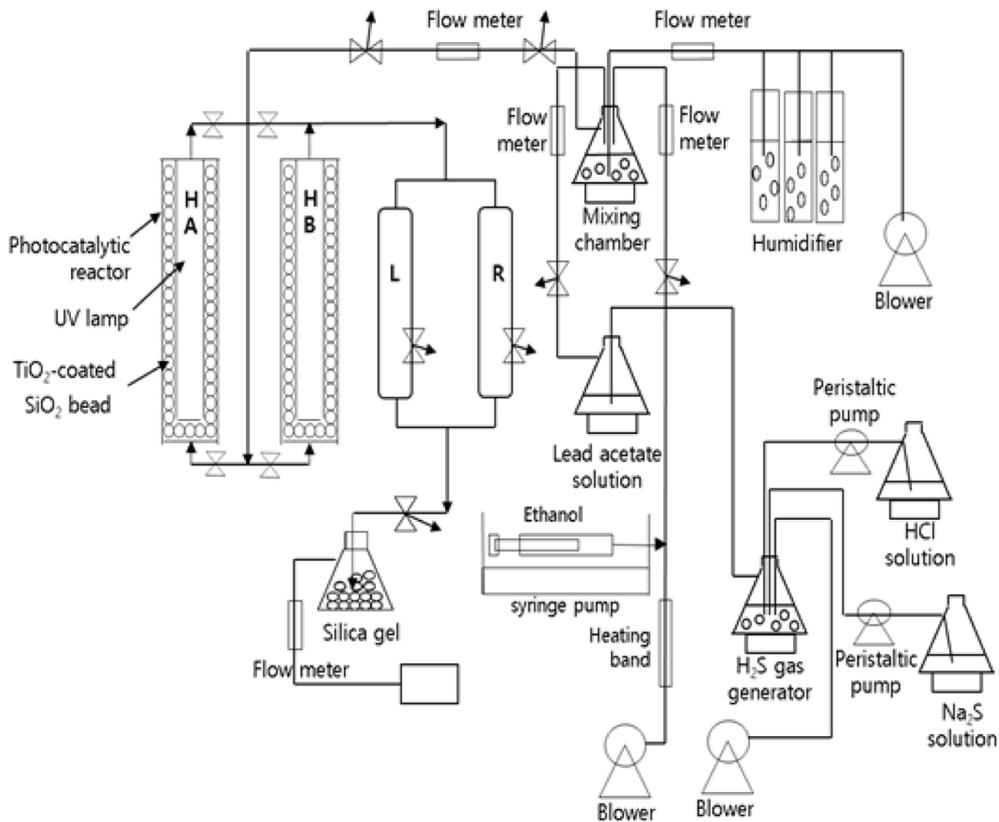


Fig. 2. Schematic diagram of alternately operating-two annular UV/photo-catalytic reactor integrated with a conventional biofilter (L reactor) and a biofilter with an improved design(R reactors), fed with synthetic contaminated air containing hydrogen sulfide and ethanol.

2-2. 실험장치 및 구성

2-2-1. 통합처리시스템의 구성

통합처리시스템을 구성하는 폐가스 공급시스템, 교대로 운전되는 두 개의 광촉매반응기 시스템[28,29] 및 바이오필터 시스템[25,26]은 본 연구의 전반부[27]의 경우에 적용된 통합 하이브리드 폐가스 처리시스템과 동일하였다. 황화수소와 에탄올의 공급 및 혼합 시스템, 교대로 운전되는 두 개의 UV/광촉매반응기 공정과 바이오필터(개선된 바이오필터시스템(R reactor)과 전통적 바이오필터(L reactor))로 구성된 통합처리시스템을 Fig. 2와 같이 나타내었다.

2-2-2. 교대로 운전되는 두 개의 광촉매반응기시스템

환형 UV/광촉매반응기는 교대로 운전되는 두 개의 광촉매반응

기로서, 외경, 내경 및 길이가 각각 8 cm, 4 cm 및 47 cm인 환형의 pyrex관을 제작하여 360 nm에서 주파장을 갖는 15W UV-A 램프 (437 mm(L)X28 mm(φ), 한성자외선)를 pyrex관의 내경 안에 삽입하였다. 그리고 교대로 운전되는 두 개의 환형 pyrex관의 내경 및 외경 사이에는 TiO₂-광촉매 담지 후에 소성시킨 평균 지름이 0.3 cm인 porous silica-based 담체를 각각 충전(유효부피 1.5 L)시켰다. Porous silica-based 담체(Fuji사, CARiAct Q-30)와, 폐가스와 접촉하는 환형 pyrex관의 내부표면을 TiO₂-광촉매 담지 후에 소성시킨 공정은 Lee와 Lim[27]의 방법으로 수행하였다.

2-2-3. 바이오필터 시스템

2-2-3-1. 전통적 바이오필터와 개선된 바이오필터시스템의 구성

전통적인 4단의 바이오필터(L reactor: $\phi=5$ cm, effective height 80 cm)와 비교했을 때에 압력강하가 적고 제거효율이 유지되기 위하여 Fig. 3(a)-(b)와 같은 2단의 바이오필터 2개로 구성된, 개선된 바이오필터시스템(R reactor: $\phi=5$ cm, 유효높이 40 cm \times 2)을 구축하였다. 바이오필터 각 단의 길이는 25 cm이고, 각 단의 유효높이로서 각 단의 충전된 미생물 담체의 높이는 20 cm이었다. 바이오필터 각 단의 sampling 구는 각 단의 바닥으로부터 8 cm 위치에 설치하였다. 바이오필터의 가장 하부 단 바닥의 아래 원뿔형 공간은 배출수 트랩으로 활용하고, 처리할 폐가스가 바이오필터에 top-down으로 공급되는 경우에 처리된 폐가스가 바이오필터 출구(exit)에서 배출되기 전에 배출수 표면과 접촉하여 배출수에 용해된 에탄올을 stripping하여 바이오필터 출구에 설치된 sampling 구에서 분석된 폐가스의 에탄올 농도에 고려되게 하였다. 한편 바이오필터에 충전하는 미생물 담체로서, (주)삼천리탄소에서 구입한 평균 지름이 2.5 mm인 입상 활성탄(BET 비표면적, 1,100 m²/g; micro-pore 용적, 0.4~0.6 cc/g; 평균세공반경, 13~20Å), 평균 지름이 0.6 mm

인 compost 및 (주)삼광수기에서 구입한 페타이어 담체(유효지름 5 mm, 비표면적 1,500 m²/m³)로 구성된 등 부피의 혼합물을 사용하였다. 페타이어 담체는, 입도 평균(median)이 25 mesh인 페타이어 분말과 EVA (ethyl vinyl acetate)의 혼합물을 압출하고 코코넛유래 활성탄 분말(150 mesh, BET 비표면적 1,107 m²/m³)을 도포하여 제조된 담체이었다. 미생물 담체에 접종할 미생물은 황화수소 분해균 주 *Enterobacter sp.* 1153 및 *Burkholderia cepacia* G4의 consortium [25]으로 하였다.

2-2-3-2. 미생물 배양 및 접종

Burkholderia cepacia G4를 바이오필터의 담체에 접종하기 위하여 Lee와 Lim[27]의 방법으로 배양하였다. 한편 *Enterobacter sp.* 1153을 바이오필터의 담체에 접종하기 위하여 Lee와 Lim[27]의 방법으로 배양하였다. 바이오필터 담체에 대한 미생물 접종은 진탕 배양된 *Burkholderia cepacia* G4와 *Enterobacter sp.* 1153을 혼합하여 48시간 동안 0.4 mL/min의 유량으로 혼합 medium을 바이오필터로 재순환시켜서 수행되었다.

3. 실험

3-1. 통합처리시스템의 운전

에탄올 및 황화수소를 동시 함유한 폐가스의 처리를 하기 위하여 교대로 운전되는 두 개의 UV/광촉매반응기와 바이오필터(개선된 바이오필터시스템(R reactor)과 전통적 바이오필터(L reactor))로 이루어진 통합처리시스템[27]을 6개월 동안 운전하였다. 통합처리시스템의 운전 순서 및 운전조건은 Tables 1과 2와 같이 적용하였다.

3-2. 통합처리시스템 단위공정의 압력강하 및 바이오필터 각 단의 미생물 population 분포

통합처리시스템을 구성하는 단위공정들로서 UV/광촉매반응기 공정에서의 압력강하를 관찰하고, 개선된 바이오필터시스템(R 반응기)으로서 전통적 바이오필터(L 반응기)를 두 개의 유닛(R_{up}과 R_{dn} 반응기)으로 나누고 처리할 폐가스를 약 반으로 나누어서 바이오필터를 나누지 않을 때와 같은 체류시간을 유지하게 하였다. 두 개의 유닛(R_{up}과 R_{dn} 반응기) 중에서 하나의 유닛(R_{up} 반응기)은 bottom-up으로, 다른 유닛(R_{dn} 반응기)은 top-down으로 공급하고, 주기적으로 각각 top-down 및 bottom-up으로 폐가스 공급 방향을 바꾸는 개선된 바이오필터시스템의 압력강하 등을 관찰하였다. 또한, top-down의 unidirectional flow(UF)를 갖는 전통적 바이오필터(L 반응기)의 압력강하를 관찰하고 개선된 바이오필터시스템(R 반응기)의 압력강하와 비교하였다. 또한, 바이오필터 L 반응기 및 R 반응기의 각 단의 담체에 고정된 미생물 콜로니 population 분포를 분석하였다.

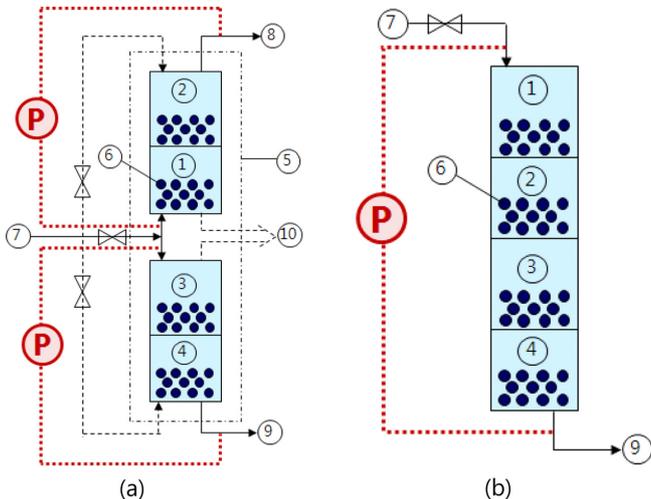


Fig. 3. (a) Biofilter system with an improved design (R reactor). 1. R_{up1} (lower column ① of upper biofilter), 2. R_{up2} (upper column ② of upper biofilter), 3. R_{dn1} (upper column ③ of lower biofilter), 4. R_{dn2} (lower column ④ of lower biofilter), 5. Biofilter system with improved design, 6. Microbes-carrying-media, 7. Waste air fed to a biofilter(solid line), 8. Treated waste air fed bottom-up, 9. Treated waste air fed top-down, 10. Treated waste air upon feeding direction being reversed, denoted as “T”(dotted line), *Ⓢ denotes a pressure gauge. (b) Conventional biofilter (L reactor): 1. L₁ (1st column ① of a biofilter), 2. L₂ (2nd column ② of a biofilter), 3. L₃ (3rd column ③ of a biofilter), 4. L₄ (4th column ④ of a biofilter), 6. Microbes-carrying-media, 7. Waste air fed to a biofilter, 9. Treated waste air fed top-down, *Ⓢ denotes a pressure gauge.

Table 1. Operating-order of integrated hybrid system for waste-air treatment

| Stage number | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Stage name | HA1 | HB1 | HA2 | HB2 | HA3T | HB3T |

- HAn and HBn denote the name of operating stage of their corresponding integrated hybrid systems composed of alternately operating photocatalytic reactors performing nth run prior to nth regeneration of photocatalyst carried in SiO₂ medium, and a biofilters of the one with an improved design and the conventional one.
- T denotes the reversal of feed direction of the biofilter with the improved design, from ⑧ and ⑨ (solid line) to ⑩ (dotted line), as shown in Fig. 3a, which took place on 15th day-operation of HA3T and was maintained until the end of the operation of HB3T.
- The running period of each stage was assigned to be 1 month.

Table 2. Operating conditions of integrated hybrid system for wate-air treatment

| Pollutants in waste air | Feed concentration (ppmv) of sequential runs in order | | | | | | Waste-air flow rate (L/min) |
|-------------------------|---|-----|-----|-----|------|------|-----------------------------|
| | HA1 | HB1 | HA2 | HB2 | HA3T | HB3T | |
| Ethanol | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 3 |
| H ₂ S | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | |

- Integrated hybrid system (HAN and HBn) for waste air treatment was composed of alternately operating-two annular UV/photo-catalytic reactor system and biofilters of the one with an improved design and the conventional one.
- The two annular photocatalytic reactors (effective volume of each reactor: 1.5 L) packed with porous SiO₂ media carrying TiO₂-anatase photocatalyst, one of which was alternately operated for a month/run while the other was regenerated by 100 °C hot air for 5 h with 15 W UV(-A)-light on for 3 d, performed to continuously treat waste air containing ethanol and hydrogen sulfide at the rate of 3 L/min.
- Waste air treated by the process of photocatalytic reactors was divided into two streams of 1.5 L/min fed, in parallel, to each biofilter of the one with the improved design and the conventional one.

3-3. 분석방법

3-3-1. 통합처리시스템의 바이오필터 별 담체의 함수율

통합처리시스템 운전을 마친 후에 바이오필터(L 반응기 및 R 반응기) 각각의 sampling 구에서 바이오필터 담체의 sample을 20 g씩 채취하여, 미리 105 °C에서 건조되고 건조된 무게가 측정된 시료 용기(petridish)에 담고 건조 전의 무게를 측정하였다. 그리고 시료 용기에 담긴 바이오필터 담체의 sample을 진공 오븐에 넣어서 105 °C에서 24 시간 동안 건조 후에 무게를 측정하였다. 이와 같은 건조 전의 담체 무게와 건조 후의 담체 무게의 차이로 바이오필터 담체의 함수율(moisture content)을 2회 측정하였다.

3-3-2. 통합처리시스템의 바이오필터 별 담체의 microbial population 분석

3-3-2-1. 콜로니 배양을 위한 고체 배지 제조

콜로니 배양을 위하여 Plate Count Agar (PCA) 배지를 사용하였고, 사용된 PCA 배지(105463 Plate count agar, MERCK, Germany)의 조성은 Table 3과 같다.

PCA 배지를 사용하여 고체 배지를 다음과 같이 제조하여 사용하였다. 증류수 1 L에 PCA 22.5 g을 넣고 충분히 교반시켜 녹인 후에, autoclave에서 121 °C에서 15 분 동안 멸균 시키고 clean bench 안에서 시료 용기(petridish)에 부어서 고체 배지를 제조하였다.

3-3-2-2. 콜로니 배양 및 계수

통합처리시스템의 운전 종료 후에 바이오필터 L 반응기와 R 반응기의 각 단에서 미생물 담체인 페타이어 담체(WT)와 활성탄(AC)으로 구분하여 각각 1 g을 취하여 10배 희석법에 따라 10, 10², 10³, 10⁴ 및 10⁵의 배수로 희석하였다. 희석한 용액의 100 μL를 clean bench 안에서 고체 배지에 떨어뜨려 도말하고, 도말한 고체 배지를 incubator에 넣고 30 °C에서 정지배양을 하였다. 정지배양을 12시간 동안 수행한 후에 배양된 콜로니수를 관찰하고 계수하였다.

3-3-2-3. 미생물 담지 바이오필터 담체의 SEM 분석

시료의 SEM 분석을 위하여 scanning electron microscopy (Hitachi, S-4300)을 사용하였다. SEM 분석을 위하여 통합처리시스템의 운전 종료 후에 개선된 바이오필터시스템(R 반응기)에 충전된 미생물 담체의 미량을 백금으로 sputter 코팅시키고, 15 kV의 가속전압에서 scanning electron microscopy로 담지된 미생물을 관찰하였다.

Table 3. Composition of Plate Count Agar(PCA) medium

| PCA medium | |
|---------------|----------|
| Yeast extract | 2.5 g/L |
| Peptone | 5.0 g/L |
| Glucose | 1.0 g/L |
| Agar | 14.0 g/L |

4. 결과 및 토론

4-1. 통합처리시스템의 바이오필터 별 바이오필터 담체의 함수율

통합처리시스템에서 전통적 바이오필터(L 반응기)와 개선된 바이오필터시스템(R 반응기)에서 각 단의 담체 함수율은 Fig. 4와 같다. L 반응기에서는 L 반응기 하단으로 갈수록 각 단 담체의 함수율이 42%에서 48%까지 증가하였다. 그러나 R_{up}과 R_{dn} 반응기에서는 각각의 R 반응기들의 하단(R_{up1}T 및 R_{dn2}T)에서 상단(R_{up2}T 및 R_{dn1}T)보다 함수율이 약 1~2% 만큼 더 높았지만, 각 단에서 50~55%의 고른 함수율을 보였다. 따라서 R 반응기들이 L 반응기보다 더 높고 더 고른 함수율을 보였다.

4-2. 통합처리시스템의 바이오필터 별 담체의 microbial population 분포

통합처리시스템에서 바이오필터의 미생물 담체인 페타이어 담체(WT)와 활성탄 담체(AC)의 미생물 분포를 확인하기 위하여 통합처리시스템의 운전이 끝난 HB3T stage의 종료 시점에서 전통적 바이오필터(L 반응기) 및 개선된 바이오필터시스템(R 반응기)의 미생물 담체의 콜로니 수 비교를 희석배수 10⁴를 사용하여 수행하였다. 그 결과로서 L 반응기 및 R 반응기 각각의 미생물 population 분포는 Figs. 5와 6과 같이 나타났다.

전통적 바이오필터인 L 반응기의 미생물 콜로니 수에 관하여, 페타이어 담체(WT)의 경우는 L₁, L₂ 단이 비슷하였고 L₃에서 콜로니 수가 다소 감소하였으나 L₄ 단에서 L₁, L₂ 단의 콜로니 수보다 거의 두 배로 증가하였다. 한편 활성탄 미생물 담체(AC)는 WT 경우보다 콜로니 수가 약 1/2 배이었으며 WT와 유사하게 L₁, L₂ 단이 콜로니 수가 서로 비슷하였으나 L₃과 L₄로 내려올수록 콜로니 수가 증가하였다. 한편 개선된 바이오필터인 R 반응기에서는, 1) R_{dn}T 반응기 경우에는, WT와 AC 각각에서 상단(R_{dn1}T)과 하단(R_{dn2}T)의 콜로니 수가 유사함이 관찰되었고, WT의 콜로니 수가 AC보다 두 배 이상 크게 관찰되었고; 2) R_{up}T 반응기 경우에는 WT와 AC 모두에서 콜로니 수가 R_{dn}T 반응기보다 약 1.5 배 이상 크게 관찰

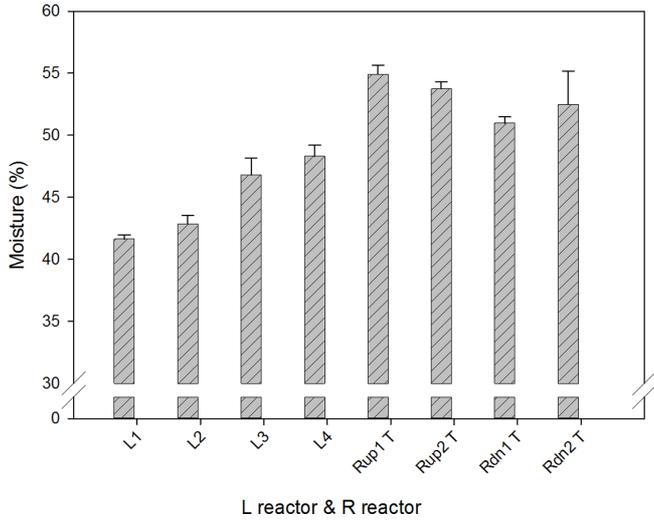


Fig. 4. Distribution of moisture (%) of biofilter-media at various effective heights of biofilters (L and R reactors).

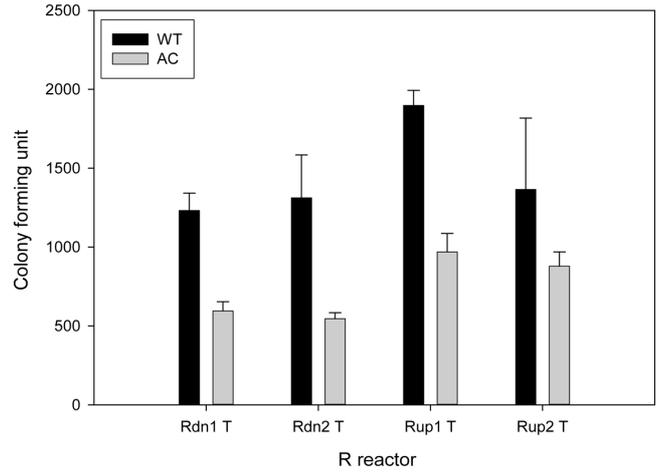


Fig. 6. Comparison of the number of colony obtained with dilution-multiplying factor of 10^4 from R_{up} and R_{dn} reactor at the end of HB3T stage (WT: waste tire-crumb media laden with microbes; AC: activated carbon media laden with microbes).

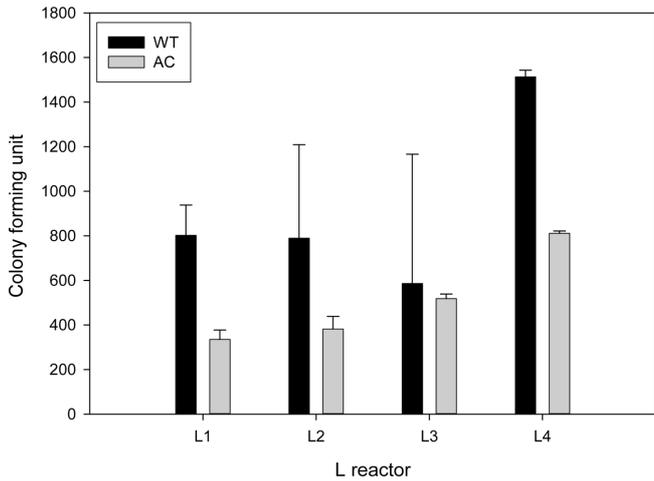


Fig. 5. Comparison of the number of colony obtained with dilution-multiplying factor of 10^4 from L reactor at the end of HB3T stage (WT: waste tire-crumb media laden with microbes; AC: activated carbon media laden with microbes).

되었으며, AC는 하단($R_{up1}T$)과 상단($R_{up2}T$)의 콜로니 수가 비슷하였고, WT는 하단($R_{up1}T$)의 콜로니 수가 상단($R_{up2}T$)보다 약간 크게 관찰되었으나 오차범위 내에서 비슷하였다. R 반응기의 $R_{dn}T$ 반응기와 $R_{up}T$ 반응기 각각에서 상단과 하단의 콜로니 수가 Fig. 6 과 같이 비슷한 것은, Fig. 4와 같이 $R_{dn}T$ 반응기와 $R_{up}T$ 반응기 각각에서 상단과 하단의 함수율이 50-55%의 고른 분포를 보인 것에 기인하였다. 한편 전통적 바이오필터인 L 반응기와 개선된 바이오필터인 R 반응기의 담체에 담지된 미생물 콜로니 수의 비교에서는 평균적으로 R 반응기가 L 반응기보다 약 50% 정도 더 크게 관찰되었다. 미생물을 담지한 바이오필터 담체에 고정된 미생물에 대한 SEM 분석결과는 Figs. 7과 같다.

4.3. 통합처리시스템의 압력강하

에탄올과 황화수소를 동시 함유한 폐가스처리를 위한 통합처리시스템의 운전 stage에 따른 각 단위공정(광촉매반응기 및 바이오

필터(L 반응기 및 R 반응기)에서의 압력강하 처리거동은 Fig. 8 과 같다.

통합처리시스템의 교대로 운전되는 광촉매 반응기의 압력강하 (Δp)는 무시할 정도로 작게 관찰되었다.

바이오필터 L 반응기의 압력강하(Δp)는 HA1 및 HB1 stages에서 계속 증가하여 2.0~5.0 mmH₂O (i.e., 2.5~6.25 mmH₂O/m)에 도달하였으며, HA2, HB2 및 HA3T stages 동안 그 값을 유지하다가 HB3T stage에서 Δp 가 4.0~5.0 mmH₂O (i.e., 5.0~6.25 mmH₂O/m)로 증가하였다. 한편 바이오필터 R 반응기의 경우에는, 1) R_{dn} 반응기는 Δp 가 운전 초기보다 증가하여 HA1 stage 중반에 0.6 mmH₂O (0.75 mmH₂O/0.5 m)에 도달하고 HA3T stage 중반까지 그 값을 유지하였다. 그러나 HA3T stage 중반에 top-down에서 bottom-up으로 유입되는 폐가스(feed) 흐름을 바꾸어서 Δp 가 거의 “0”으로 감소하였다; 2) 반면에 R_{up} 반응기는 Δp 를 HA1 및 HB1 stage에서 거의 “0”을 유지하고, HA2 및 HB2 stage 중반까지 Δp 를 0.2 mmH₂O (0.25 mmH₂O/0.5 m)를 유지하다가 다시 증가하여 HA3T stage 중반까지 약 0.5 mmH₂O (0.63 mmH₂O/0.5 m)를 유지하였다.

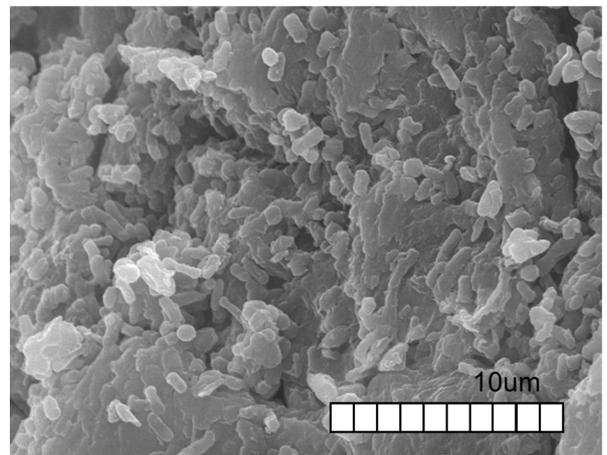


Fig. 7. SEM (Hitachi, S-4300) image of the surface of microbes-carrying media from R reactor.

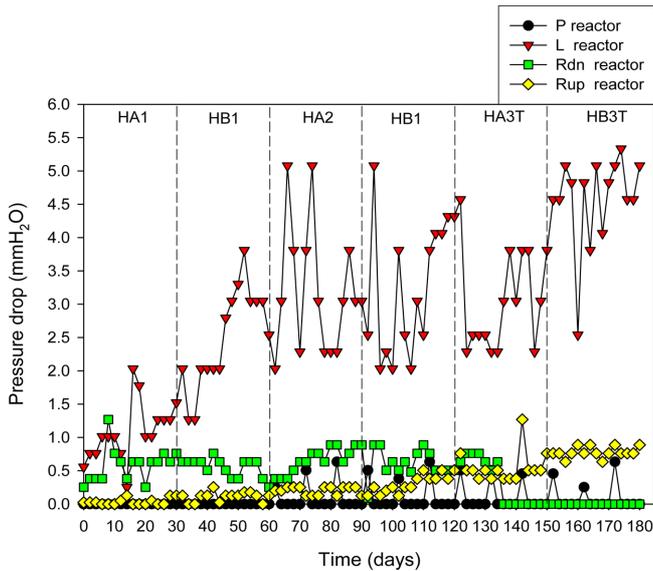


Fig. 8. Transient behavior of pressure drops of photocatalytic reactor (P reactor) and biofilters [L reactor (conventional biofilter) and R reactor (biofilter system with a improved design) composed of R_{dn} reactor and R_{up} reactor as shown in Fig. 3] according to the operational order of integrated hybrid system treating waste air containing ethanol and hydrogen sulfide.

그러나 HA3T stage 중반에 bottom-up에서 top-down으로 유입되는 폐가스(feed) 흐름을 바꾸어서 Δp 는 $0.8 \text{ mmH}_2\text{O}$ ($1 \text{ mmH}_2\text{O}/0.5 \text{ m}$)로 증가하였다. 따라서 R 반응기는 L 반응기에 비해서 약 16~20% 이하의 Δp 를 나타내었다. 본 연구에서 이러한 Δp 의 % 비는, Lee와 Lim[25]이 보고한 전통적 바이오필터 압력강하의 약 40~80% 이상을 감소시켰다는 개선된 바이오필터의 압력강하의 전통적 바이오필터 압력강하에 대한 % 비보다 더 적었다.

한편, Grubecki[23]는 목재 칩(wood chip)과 목재 바크(wood bark)를 50 대 50으로 혼합하여, 입자들의 입도 분포가 10 mm 이하이고 입자들의 평균 입도가 1.6 mm 인 혼합물을 바이오필터 담체로 사용하여 악취와 기타 가스상의 오염원 배출을 줄이는 폐가스 처리를 수행하였다. 바이오필터 운전에서 수분함량이 28.3% 이하에서는 비교적 작은 압력강하가 발생하였지만, 수분함량이 28.3% 보다 클 경우에는 압력강하가 크게 증가하였다고 보고하였는데, 수분함량이 28.3%이고 본 연구의 운전조건인 약 0.01 m/s 의 공탑 속도(superficial velocity)에서 약 $10 \text{ mmH}_2\text{O}/\text{m}$ 의 압력강하를 보였다. 한편, 페타이어 담체 등을 바이오필터의 미생물 담체로 사용한 본 연구에서는 전통적 바이오필터(L 반응기)에서 미생물 담체의 수분 함수율이 28.3%를 초과하였음에도 불구하고 최대 압력강하 값이 $5.0\sim 6.25 \text{ mmH}_2\text{O}/\text{m}$ 를 보였다. 한편, 본 연구의 개선된 바이오필터(R 반응기)에서는 미생물 담체의 수분함량이 각 단에서 28.3%를 훨씬 초과하였음에도 불구하고, 50~55%의 고른 함수율을 보였고 최대 압력강하 값이 훨씬 적은 $1 \text{ mmH}_2\text{O}/0.5 \text{ m}$ 를 보였다. 따라서 본 연구에서는 28.3%를 초과한 수분 함수율에도 불구하고, Grubecki [23]가 보고한 압력강하 값보다 전통적 바이오필터(L 반응기)에서도 약 37~50%(A)만큼 저감된 압력강하를 보였고, 개선된 바이오필터시스템(R 반응기)에서는 약 90%(B)만큼이나 저감된 압력강하를 보였다. 그러므로 본 연구에서 적용한 공극율

이 큰 페타이어 담체 등의 바이오필터 담체 및 개선된 바이오필터 시스템 설계의 적용이, Grubecki[23]이 보고한 압력강하 값보다 각각 37~50%(A)와 40~53%(B-A)만큼 압력강하 저감에 공헌하였다고 분석되었다.

바이오필터 담체로서 평균 입도가 각각 $6\sim 13 \text{ mm}$ 및 $1\sim 6 \text{ mm}$ 이고, 공극율이 각각 0.7 및 0.58인 화산석(scoria) 및 compost를 각각 75 대 25로 혼합한 복합담체를 충전한 바이오필터를 사용하여 자일렌(xylene) 증기(vapor)를 처리한 Amin 등[24]의 연구에서, 바이오필터의 유효높이는 본 연구와 같은 80 cm 이었고 최대 공탑속도가 0.88 cm/s 의 조건에서 바이오필터를 운전하여 $4 \text{ mmH}_2\text{O}$ ($5 \text{ mmH}_2\text{O}/\text{m}$) 이하의 압력강하를 관찰하였다고 보고하였다. 본 연구에서는 공탑속도가 1.27 cm/s 의 조건에서 전통적 바이오필터(L 반응기)는 Amin 등[24]이 보고한 압력강하 값과 유사한 $5.0\sim 6.25 \text{ mmH}_2\text{O}/\text{m}$ 의 압력강하를 보였다. 이러한 유사한 압력강하 값은 scoria 담체와 페타이어 담체의 서로 비슷하게 높은 공극율에 기인한다고 분석되었고, 그럼에도 불구하고 본 연구의 공탑 속도가 Amin 등[24]의 경우보다 44%만큼 더 크다는 점을 고려하였을 때에 본 연구에서 바이오필터에 적용한 복합 담체가 상대적으로 더욱 우수함을 나타내었다. 한편 개선된 바이오필터(R 반응기)에서 관찰된 압력강하 값은 Amin 등[24]이 보고한 압력강하 값의 20%에 불과하여, Amin 등[24]이 보고한 압력강하값의 80%가 저감되었다. 이러한 본 연구의 개선된 바이오필터(R 반응기)의 운전에서 압력강하 값이 Amin 등[24]이 보고한 압력강하 값의 80%만큼 저감된 결과는 주로 개선된 바이오필터의 설계[25,26]의 적용에 기인하였다고 해석되었다.

5. 결 론

통합처리시스템의 교대로 운전되는 광촉매 반응기의 압력강하(Δp)는 무시할 정도로 작게 관찰되었다. 한편, 개선된 바이오필터 시스템은 전통적 바이오필터에 비해서 약 16~20% 이하의 작은 Δp 를 나타내었다. 본 연구에서 이러한 Δp 의 % 비는, Lee와 Lim[25]이 보고한 개선된 바이오필터가 전통적 바이오필터 Δp 의 약 40~80% 이상을 감소시켜서, 개선된 바이오필터의 Δp 가 전통적 바이오필터 Δp 의 20~60% 이하인 % 비보다 더 적었다. Grubecki[23]가 보고한 압력강하 값보다 전통적 바이오필터(L 반응기)에서도 약 37~50%(A)만큼 저감된 압력강하를 보였고, 개선된 바이오필터시스템(R 반응기)에서는 약 90%(B)만큼이나 저감된 압력강하를 보였다. 그러므로 본 연구에서 적용한 공극율이 큰 페타이어 담체 등의 바이오필터 담체 및 개선된 바이오필터시스템 설계의 적용이, Grubecki[23]가 보고한 압력강하 값보다 각각 37~50%(A)와 40~53% (B-A)만큼 압력강하 저감에 공헌하였다고 분석되었다. 또한 본 연구의 개선된 바이오필터(R 반응기)의 운전에서 압력강하 값이 Amin 등[24]이 보고한 압력강하 값보다 80%만큼 저감된 결과는 주로 개선된 바이오필터의 설계[25,26]의 적용에 기인하였다고 해석되었다.

통합처리시스템에서 바이오필터 담체의 microbial population 분포로서 전통적 바이오필터(L 반응기) 및 개선된 바이오필터(R 반응기)의 담체 내 미생물 콜로니 수 비교에서는 L 반응기가 L₄ 단에서 L₁, L₂ 단의 콜로니 수보다 거의 두 배로 증가하였으나, R 반응기가 L 반응기보다 평균적으로 약 50% 정도 더 컸고 상단과 하단

에서 고르게 분포하였는데, R 반응기의 상단과 하단의 함수율이 50~55%의 고른 분포를 보인 것에 기인하였다. R_{dn} T 반응기 경우에는, WT와 AC 각각에서 상단과 하단의 콜로니 수가 유사함이 관찰되었고, WT의 콜로니 수가 AC보다 두 배 이상 크게 관찰되었다. R_{up} T 반응기 경우에는 콜로니 수가 R_{dn} T 반응기보다 약 1.5 배 이상 크게 관찰되었으며 하단(R_{up1} T)과 상단(R_{up2} T)의 콜로니 수가 오차 범위 내에서 비슷하였다. 따라서 개선된 바이오필터시스템은 전통적 바이오필터와 다르게 바이오필터 별 담체의 microbial population의 고른 분포를 보였다.

References

- Ndegwa, P. M., Hristov, A. N., Arogo, J. and Sheffield, R. E., "A Review of Ammonia Emission Mitigation Techniques for Concentrated Animal Feeding Operations," *Biosystems Engineering*, **100**(4), 453-469(2008).
- Sun, Y., Quan, X., Chen, J., Yang, F., Xue, D., Liu, Y. and Yang, Z., "Toluene Vapour Degradation and Microbial Community in Biofilter at Various Moisture Content," *Process Biochemistry*, **38**(1), 109-113(2002).
- Baltrenas, P., Janusevicius, T. and Kleiza, J., "Effect of Packing Material Composition on the Aerodynamic Processes in a Wavy Lamellar Plate-Type Biofilter," *Processes*, **9**(4), 625(2021).
- Yang, C. P., Suidan, M. T., Zu, X. Q. and Kim, B. J., "Biomass Accumulation Patterns for Removing Volatile Organic Compounds in Rotating Drum Biofilters," *Water Sci. Tech.*, **48**, 89-96 (2003).
- Alonso, C., Suidan, M. T., Kim, B. R. and Kim, B. J., "Dynamic Mathematical Model for the Biodegradation of VOCs in a Biofilter: Biomass Accumulation Study," *Environ. Sci. Technol.*, **2**, 3118-3123(1998).
- Okkerse, W. J. H., Ottengraf, S. P. P., Osinga-Kuipers, B. and Okkerse, M., "Biomass Accumulation and Clogging in Biotrickling Filters for Waste Gas Treatment," *Biotechnol. Bioeng.*, **63**, 418-430(1999).
- Smith, F. L., Sorial, G. A., Suidan, M. T., Breen, A. W. and Bismas, P., "Development of Two Biomass Control Strategies for Extended, Stable Operation of Highly Efficient Biofilters with High Toluene Loadings," *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 1744-1751(1996).
- Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., "Biomass Control in Waste Air Biotrickling Filters by Protozoan Predation," *J. Eng. Appl. Sci.*, **62**, 216-224(1999).
- Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., "Chemical Removal of Biomass from Waste Air Biotrickling Filters: Screening Chemicals of Potential Interest," *Water Res.*, **33**, 2383-2391(1999).
- Moe, W. M. and Irvine, R. L., "Polyurethane Sponge Medium for Biofiltration, II: Operation and Performance," *J. Environ. Eng.*, **126**, 826-832(2000).
- Kenes, C. and Veiga, M. C., "Inert Filter Media for the Biofiltration of Waste Gas-characteristics and Biomass Control," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, **1**, 201-214(2002).
- Yang, C. P., Suidan, M. T., Zu, X. Q. and Kim, B. J., "Comparison of Single-layer and Multi-layer Rotating Drum Biofilters for VOC Removal," *Environ. Prog.*, **22**, 87-94(2003).
- Dorado, A. D., Baeza, J. A., Lafuente, J., Gabriel, D. and Gamisans, X., "Biomass Accumulation in Biofilter Treating Toluene at High Loads-Part 1: Experimental Performance from Inoculation to Clogging," *Chem. Eng. J.*, **209**, 661-669 (2012).
- Chen, L. and Hoff, S. J., "A Two-stage Wood Chip-based Biofilter System to Mitigate Odors from a Deep-pit Swine Building," *Applied Engineering in Agriculture*, **28**(6), 893-901(2012).
- Kristensen, E. F., Kofman, P. D. and Jensen, P. D., "Counter Pressure on Ventilation of Different Types of Wood Chip and Chunkwood," *Biomass and Bioenergy*, **25**(4), 399-408(2003).
- Shareefdeen, Z., "Hydrogen Sulfide (H₂S) Removal Using Schist Packings in Industrial Biofilter Applications," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **32**(1), 15-19(2015).
- Lee E. J. and Lim, K.-H., "A Dynamic Adsorption Model for the Gas-phase Biofilters Treating Ethanol: Prediction and Validation," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **29**(10), 1373-1381(2012).
- Swanson, W. J. and Loehr, R. C., "Biofiltration: Fundamentals, Design and Operations Principles, and Applications," *Journal of Environmental Engineering*, **123**(6), 538-546(1997).
- Williams, T. O. and Miller, F. C., "Odor Control Using Biofilters: Part 1. This Overview of Basic Design and Operating Criteria Explains How Biofilters Can be Used More Efficiently to Control Odors Emanating from Composting Facilities," *BioCycle*, **33**, 72-77(1992).
- Baquerizo, G., Maestre, J. P., Sakuma, T., Deshusses, M. A., Gamisans, X., Gabriel, D. and Lafuente, J., "A Detailed Model of a Biofilter for Ammonia Removal: Model Parameters Analysis and Model Validation," *Chemical Engineering Journal*, **113**(2-3), 205-214(2005).
- Chen, Y.-X., Yin, J. and Wang, K.-X., "Long-term Operation of Biofilters for Biological Removal of Ammonia. Chemosphere," **58**(8), 1023-1030(2005).
- Chen, L. and Hoff, S. J., "Mitigating Odors from Agricultural Facilities: a Review of Literature Concerning Biofilters," *Applied Engineering in Agriculture*, **25**(5), 751-766(2009).
- Grubecki, I., "Airflow Versus Pressure Drop for a Mixture of Bulk Wood Chips and Bark at Different Moisture Contents," *Biosystems Engineering*, **139**, 100-110(2015).
- Amin, M. M., Rahimi, A., Bina, B., Heidari, M. and Moghadam, "Performance Evaluation of a Scoria-compost Biofilter Treating Xylene Vapors," *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, **12**(1), 140(2014).
- Lee, E. J. and Lim, K.-H., "Biofilter Treatment of Waste Air Containing Malodor and VOC: 1. Pressure Drop and Microbe Population Distribution of Biofilter with Improved Design," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(1), 127-135(2013).
- Lim, K.-H. and Lee, E. J., "Novel Process System Composed of UV(or VIS-)/photo-catalytic Reactor Washable During its Operation and Robust Biofilter System to Treat Waste Air Containing Malodorous and Volatile Organic Compounds," Korean Patent No. 10-0942147(2010).
- Lee, E. J. and Lim, K.-H., "Time-dependent Behavior of Waste-air Treatment Using Integrated Hybrid System," *Korean Chem. Eng. Res.*, **60**(1), 100-115(2022).
- Lee, E. J. and Lim, K.-H., "Performance of Waste-air Treating System Composed of Two Alternately-operating UV/photo-catalytic Reactors and Evaluation of Its Characteristics," *Korean Chem. Eng. Research*, **59**(4), 574-583(2021).

29. Lee, E. J., Jung, C. H. and Lim, K.-H., "Characterization of Repeated Deactivation and Subsequent Re-activation of Photocatalyst Used in Two Alternately-operating UV/photocatalytic Reactors of Waste-air Treating System," *Korean Chem. Eng. Research*, **59**(4), 584-595(2021).

Authors

Eun Ju Lee: Invited Lecturer/Post-Doctoral Researcher, Department of Chemical Engineering, Daegu University, Kyungsan, 38453, Korea; Principal Investigator, Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment, Kyungsan, 38453, Korea; Director, Eco Valley Global, Youngchon, 38911, Korea; blue7432@gmail.com

Kwang-Hee Lim: Professor, Department of Chemical Engineering, Daegu University, Kyungsan, 38453, Korea; Director, Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment, Kyungsan, 38453, Korea; President, Eco Valley Global, Youngchon, 38911, Korea; khlim@daegu.ac.kr